
ПОЖАРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

Научная статья

УДК 614.84:621.313.3; DOI: 10.61260/1998-8990-2026-1-99-111

АНАЛИЗ ОТКАЗОВ И ОЦЕНКА ПОЖАРНОЙ ОПАСНОСТИ СИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Баширов Мусса Гумерович;

✉ Дюльдин Никита Денисович.

Уфимский государственный нефтяной технический университет, г. Салават, Россия

✉ hukutko2014@gmail.com

Аннотация. Исследуются вопросы пожарной безопасности синхронных электрических машин, эксплуатируемых в энергетике и промышленности. Целью работы является разработка метода количественной оценки вероятности возникновения пожара при эксплуатации синхронных электрических машин с учётом статистики отказов и особенностей их перехода в пожароопасные состояния. Проведён анализ нормативных документов, отчётов МЧС России и Ростехнадзора, а также данных научных публикаций и средств массовой информации. Представлена классификация причин пожаров, связанных с эксплуатацией синхронных электрических машин, выделены доминирующие факторы пожарного риска, включая межвитковые замыкания, перегрев подшипниковых узлов, утечки охлаждающих и смазочных сред. Рассмотрены примеры крупных аварий, вызванные неисправностью синхронных электрических машин, с оценкой их экономических и социальных последствий. Для оценки риска возникновения пожара предложено использование интегрального критерия, позволяющего выявлять предаварийные состояния. Разработана вероятностная модель, учитывающая как интенсивность отказов, так и условную вероятность их перехода в возгорание. Расчёты для средней наработки на отказ синхронных электрических машин показали, что риск возникновения пожара составляет 1,5–2 % при условии исправной работы защитных систем, что подтверждает эффективность превентивных мер.

Научная новизна работы заключается в разработке вероятностной модели оценки пожарной опасности синхронных электрических машин, учитывающей как интенсивность отказов, так и условную вероятность перехода отказа в возгорание. Полученные результаты могут быть использованы при анализе пожарного риска на объектах энергетики и промышленности, а также при разработке мероприятий по повышению уровня пожарной безопасности электрооборудования.

Ключевые слова: синхронные электрические машины, пожарная безопасность, вероятность отказа, спектральная диагностика, интегральный критерий пожарной опасности, энергетика, промышленная безопасность

Для цитирования: Баширов М.Г., Дюльдин Н.Д. Анализ отказов и оценка пожарной опасности синхронных электрических машин // Проблемы управления рисками в техносфере. 2026. № 1 (77). С. 99–111. DOI: 10.61260/1998-8990-2026-1-99-111

Scientific article

FAILURE ANALYSIS AND FIRE HAZARD ASSESSMENT OF SYNCHRONOUS ELECTRIC MACHINES**Bashirov Mussa G.;**✉ **Dyuldin Nikita D.****Ufa state petroleum technological university, Salavat, Russia**✉ ***hukutko2014@gmail.com***

Abstract. This article examines fire safety issues related to synchronous electric machines used in the power and industrial sectors. The aim of the study is to develop a method for quantitatively assessing the fire risk during operation of synchronous electric machines, taking into account failure statistics and the characteristics of their transition to fire-hazardous conditions. Regulatory documents, reports from EMERCOM of Russia and Rostekhnadzor, as well as scientific publications and media data are analyzed. A classification of fire causes associated with the operation of synchronous electric machines is presented, identifying the dominant fire risk factors, including interturn short circuits, overheating of bearing assemblies, and leaks of cooling and lubricating fluids. Examples of major accidents caused by synchronous electric machine failures are considered, with an assessment of their economic and social consequences. To assess the fire risk, an integral criterion is proposed for identifying pre-emergency conditions. A probabilistic model is developed that takes into account both the failure rate and the conditional probability of their transition to fire. Calculations of the mean time between failures of synchronous electric machines showed that the risk of fire is 1,5–2 %, assuming proper operation of protective systems, confirming the effectiveness of preventive measures.

The scientific novelty of this study lies in the development of a probabilistic model for assessing the fire hazard of synchronous electric machines, taking into account both the failure rate and the conditional probability of a failure turning into a fire. The results obtained can be used in fire risk analysis at energy and industrial facilities, as well as in developing measures to improve the fire safety of electrical equipment.

Keywords: synchronous electric machines, fire safety, failure probability, spectral diagnostics, integral fire hazard criterion, power engineering, industrial safety

For citation: Bashirov M.G., Dyuldin N.D. Failure analysis and fire hazard assessment of synchronous electric machines // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere = Problems of risk management in the technosphere. 2026. № 1 (77). P. 99–111. DOI: 10.61260/1998-8990-2026-1-99-111

Введение

Пожарная безопасность электрооборудования, в том числе синхронных электрических машин (СЭМ), является одной из ключевых составляющих обеспечения техносферной безопасности промышленных объектов и энергетических установок [1]. В соответствии с Федеральным законом от 22 июля 2008 г. № 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» (ФЗ-123) пожарная безопасность – это состояние защищённости личности, имущества, общества и государства от пожаров, при котором исключается возможность возникновения и развития пожара, а также воздействия на людей опасных факторов пожара и последствий такого воздействия.

СЭМ широко применяются в электроэнергетике, металлургии, нефтегазовой и химической промышленности, на транспорте и в других отраслях экономики. Их эксплуатация связана с воздействием электрических, тепловых, механических и вибрационных нагрузок, что при нарушении требований технической эксплуатации может привести к возникновению аварийных режимов, сопровождающихся повышением температуры обмоток, разрушением изоляции и возгоранием [2]. Рост единичных мощностей, высокие токи возбуждения, плотная

компоновка в машинных залах, а также широкое применение водородного и масляного охлаждения СЭМ приводит к повышенному риску возникновения пожароопасных ситуаций при их эксплуатации.

По данным официальной статистики МЧС России и Ростехнадзора, пожары, вызванные неисправностью или неправильной эксплуатацией СЭМ, составляют значительную долю от общего числа технологических пожаров на промышленных объектах. Такие инциденты сопровождаются не только прямыми материальными потерями (повреждение оборудования, стоимость восстановительных работ), но и косвенными – длительными простоями технологических линий, нарушением производственного цикла, снижением объёмов выпуска продукции и, в отдельных случаях, угрозой жизни и здоровью персонала [3, 4].

В период 2021–2025 гг. в отечественных научных исследованиях усилилось внимание к вопросам оценки пожарного риска на промышленных и энергетических объектах в рамках риск-ориентированного подхода к обеспечению пожарной безопасности. В работе [5] рассматривается расчёт пожарного риска, основанный на вероятностной оценке опасных событий. Отмечается необходимость проведения анализа отказов технических систем по отдельным отраслям промышленности с целью снижения производственного риска. В исследовании [6] отражены недостатки применяемых методик расчёта пожарного риска, а также даны практические рекомендации по их совершенствованию.

Практическим аспектам оценки пожарного риска посвящены исследования, в которых используются статистические данные о пожарах, вероятностные модели и сценарный анализ [7, 8]. Например, для количественной оценки пожарного риска на опасных производственных объектах используется балльно-факторная методика оценки частоты пожароопасных событий.

Отмечается рост пожарного и взрывопожарного риска на объектах водородной энергетики и нефтегазового комплекса в связи с расширением масштабов их эксплуатации. Снижение риска связывается с применением систем раннего обнаружения возгораний, а также развитием научно-методических подходов к оценке и управлению пожарным риском [9].

В то же время анализ работ показывает, что оценка пожарного риска, связанного непосредственно с эксплуатацией электрических машин большой и средней мощности, включая синхронные электрические машины, остаётся недостаточно детализированной. Как правило, данные объекты рассматриваются обобщённо в составе электроустановок, без учёта специфических механизмов формирования пожарной опасности, связанных с электрическими и механическими дефектами.

Статистика причин пожаров показывает, что основными факторами их возникновения являются: повреждение или старение изоляции обмоток, перегрузка и перегрев узлов, искрение контактных соединений, нарушение правил эксплуатации, а также конструктивные недостатки оборудования. Своевременное выявление и устранение этих факторов, а также применение современных систем мониторинга и защиты позволяют существенно снизить вероятность возникновения пожара [10, 11].

Настоящая работа направлена на анализ статистики пожаров, возникающих при эксплуатации СЭМ, выявление их основных причин и факторов риска, оценку понесённых убытков, а также разработку предложений по совершенствованию технических мер предотвращения пожаров с учётом требований действующей нормативной документации и передового международного опыта.

Теоретические основы и методы исследования

В качестве объектов исследования в работе рассматриваются синхронные электрические машины средней и большой мощности, применяемые в энергетике и промышленности. Основное внимание уделялось генераторам и электродвигателям, эксплуатируемым в составе энергоблоков тепловых и гидроэлектростанций, а также синхронным двигателям, используемым в насосных и компрессорных установках.

Методологическая база исследования включает сочетание статистического анализа, вероятностного моделирования и методов технической диагностики [12]. Для статистического анализа аварийности и пожаров использовались официальные данные МЧС России, Ростехнадзора, материалы страховых компаний, а также публикации в научных журналах и отраслевых средствах массовой информации за период 1975–2024 г. Проведена классификация пожаров по причинам возникновения и условиям эксплуатации, составлен обобщенный перечень последствий аварий и частота их возникновения [13].

Вероятность возникновения пожара при эксплуатации СЭМ оценивалась на основании статистики отказов и данных технической диагностики [14, 15]. Для каждого типа отказа i задано:

– $p_i = P(\text{событие отказа типа } i \text{ за } t)$ – вероятность появления отказа этого типа за рассматриваемый период;

– $q_i = P(\text{пожар} | \text{отказ типа } i)$ – условная вероятность, что данный отказ приведет к пожару.

При предположении независимости событий появления пожара от разных типов событий отказа вероятность того, что ни один тип не вызовет пожар:

$$\prod_i (1 - p_i q_i). \quad (1)$$

Тогда искомая вероятность возникновения пожара от перечисленных причин за период времени наработки на отказ:

$$P_{\text{пожар}} = 1 - \prod_i (1 - p_i q_i). \quad (2)$$

При оценке учитывались различные группы отказов: электрические, тепловые, механические и эксплуатационные.

Для выявления предаварийных состояний предложено использование электромагнитного спектрального метода диагностики синхронных электрических машин по параметрам гармонического спектра фазных токов и напряжений. Метод соответствует ГОСТ 32144–2013 «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения», ГОСТ 30804.4.30–2013 «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Методы измерений показателей качества электрической энергии» и ГОСТ 31819.21–2012 «Аппаратура для измерения электрической энергии переменного тока. Частные требования. Часть 21. Статические счетчики активной энергии классов точности 1 и 2», обоснованность и достоверность результатов обеспечивается соблюдением требований ГОСТ Р 8.563–2009 «Государственная система обеспечения единства измерений. Методика выполнения измерений».

Результаты исследования и их обсуждение

Обеспечение пожарной безопасности при эксплуатации СЭМ регламентируется комплексом федеральных законов, технических регламентов, сводов правил и стандартов, которые устанавливают обязательные требования к проектированию, монтажу, эксплуатации и техническому обслуживанию электротехнического оборудования. Международная практика закреплена в стандартах IEC 60034 «Rotating electrical machines» и NFPA 70 «National Electrical Code», которые содержат аналогичные требования по допустимым температурным режимам, защите от перегрузок, контролю изоляции и применению автоматических систем пожарной защиты. Сравнительный анализ показывает, что российские нормативные акты в целом соответствуют международным подходам, однако, в них недостаточно подробно регламентированы методы постоянного мониторинга технического состояния СЭМ

и интеграция современных диагностических систем в комплексы обеспечения пожарной безопасности.

Таким образом, действующая нормативно-правовая база формирует основу для предотвращения пожаров в СЭМ. Её практическая реализация требует комплексного применения технических и организационных мер, а также адаптации международного опыта в части перехода к предиктивному обслуживанию и непрерывному мониторингу технического состояния СЭМ.

Статистический анализ причин пожаров в синхронных электрических машинах

Анализ данных МЧС России, Ростехнадзора и публикаций Всероссийского института противопожарной обороны МЧС России показывает, что в структуре пожаров, связанных с эксплуатацией электрических машин, синхронные машины составляют в среднем 15–20 % случаев. Несмотря на высокую надёжность этого типа оборудования, характер его работы в тяжёлых промышленных условиях повышает риск возникновения аварийных режимов, способных привести к возгоранию. Классификация причин пожаров отражена в табл. 1.

Таблица 1

Классификация причин пожаров с СЭМ

Группа причин	Примеры	Доля случаев, %
Электрические	Короткое замыкание в обмотках, пробой изоляции, дуговые разряды, неисправность системы возбуждения и выводов, ослабление соединений	42
Механические	Перегрев подшипников, дисбаланс, разрушение бандажных узлов/крепёжа	18
Маслосистема	Разлив/туман турбинного масла на горячие поверхности, отказ отсечек и маслоуловителей	15
Водородная система	Утечки водорода из системы охлаждения генератора	10
Эксплуатационные	Нарушение регламентов технического обслуживания (ТО), работа при недопустимых нагрузках, несвоевременный ремонт	8
Автоматика/защита	Запаздывающая детекция без локального прицеливания на узлы, недостаточность локального автоматического тушения в нишах СЭМ и маслосистем	5
Внешние	Воздействие пожара извне, попадание посторонних предметов	2

Динамика пожаров за последние 50 лет:

– 1975–1990 гг.: преобладание электрических первопричин и частые возгорания из-за дефектов маслосистем;

– 1990-е гг.: рост доли организационно-эксплуатационных факторов на фоне трансформаций отрасли, локальные решения в области пожарной безопасности внедряются неравномерно;

– 2000-е гг.: удельные мощности растут, инциденты высокой тяжести пожаров в машинных залах возникают по причине взрывов водорода, эти события подтолкнули усиление требований к маслосистемам и газоанализу;

– 2010-е гг.: цифровая диагностика входит в норму, одновременно с этим силовая электроника повышает чувствительность изоляции/подшипников к паразитным эффектам;

– 2020-е гг.: регулярный фон пожаров по стране по-прежнему возникает по причине электрических и механических дефектов, инцидентов с пожарами из-за неисправности маслосистем и систем водородного охлаждения меньше. Тяжесть и ущерб от пожаров остаются большими.

По статистике электрические причины занимают лидирующее место (более 40 %), что указывает на необходимость приоритетного контроля. Электроэнергетика в отношении пожаров СЭМ фигурирует в 37 % случаев, на долю металлургии приходится 23 %, нефтехимии 18 %, а на прочие отрасли 22 %. Таким образом, наибольшая концентрация пожаров отмечается в энергетике и металлургии, где оборудование эксплуатируется в условиях высокой нагрузки и повышенных температур.

Вероятность возникновения $p_i|q_i$ исходя из собранной статистики, при наработке на отказ СЭМ продемонстрирована в табл. 2.

Таблица 2

Частота отказов за срок наработки на отказ при нормальном режиме эксплуатации

№	Тип отказа	$p_i q_i$
1	Короткое замыкание	2 %
2	Ослабление контакта	5 %
3	Дефект подшипника	3–4 %
4	Разлив/утечка масла	1–15 %
5	Утечка водорода	5–60 %
6	Дефект кабеля	3–4 %
7	Внешний пожар	1–25 %
8	Ошибки эксплуатации/ТО	3–10 %

Межвитковые КЗ и проблемы с ослаблением контактных соединений происходят часто, однако, редко приводят к пожару, утечки масла и водорода возникают редко, но риск возгорания выше. Подставляя значения в формулу 1, получаем $P_{\text{пожар}} \approx 0,0153 = 1,53 \%$.

При рассчитанных вероятностях возникновения хотя бы одного пожара, связанного с перечисленными типами отказов за 60 000 ч для одного агрегата, составляет приблизительно 1,5 %. Данная вероятность не противоречит общей вероятности отказа приближенной к 100 %, так как большинство отказов не трансформируются в пожар благодаря конструктивным особенностям, защитами и оперативным действиями.

Экономическая оценка ущерба

Пожары с участием синхронных электродвигателей, особенно высокой мощности, дают двойной эффект ущерба – прямой материальный и косвенный социально-экономический.

К прямым убыткам относятся: повреждение оборудования – ремонт или замена СЭМ, повреждение сопутствующих систем, разрушение здания/сооружений в случае масштабного пожара, затраты на тушение. К косвенным убыткам относятся: простой производства – СЭМ обычно работают в ключевых технологических цепочках (насосные станции, компрессоры, мельницы, прокатные станки, подъёмные установки), даже несколько часов простоя может привести к миллионным потерям, а при длительном ремонте – к срыву контрактов. Снижение выработки/производительности в энергетике, металлургии, цементной и нефтехимической промышленности. Логистические потери – нарушение графика отгрузки продукции, срыв поставок.

К социальным последствиям принято относить угрозу жизни и здоровью персонала, включая ожоги, отравление продуктами горения, травмы при эвакуации. Рост безработицы при банкротстве после крупного пожара, социальная напряжённость в регионе, где предприятие является градообразующим. Потеря доверия инвесторов и партнёров может повлиять на долгосрочную устойчивость бизнеса.

К дополнительным долгосрочным последствиям относится повышение страховых взносов для предприятия, ужесточение надзорных проверок, потеря репутации предприятия и бренда на рынке. Введение более жёстких регламентов технического обслуживания, что увеличивает эксплуатационные расходы. Ущерб от экономических и социальных последствий пожара показан в табл. 3.

Таблица 3

Ущерб от экономических и социальных последствий пожара с СЭМ

Категория	Фактор	Описание	Ориентировочный ущерб
Прямые убытки	Повреждение синхронного электродвигателя	Замена или капитальный ремонт	10–60 млн руб.
	Повреждение кабельных линий и вспомогательных систем	Восстановление	2–15 млн руб.
	Разрушение строительных конструкций	Ремонт или реконструкция	5–40 млн руб.
	Затраты на тушение и ликвидацию последствий	Оплата работы МЧС России, спецтехники	0,5–5 млн руб.
Косвенные убытки	Простой производства	Потери прибыли, срыв контрактов	0,5–5 млн руб./сут
	Снижение производительности	Частичная загрузка мощностей	1–10 млн руб./мес.
	Логистические потери	Срыв поставок и штрафные санкции	0,2–3 млн руб.
Социальные последствия	Травмы или гибель персонала	Выплаты, утрата трудоспособности	не оценивается напрямую
	Эвакуация населения	Организация временного размещения	0,1–1 млн руб.
	Безработица и социальная напряжённость	Длительный простой предприятия	не оценивается напрямую

Методы предотвращения пожаров в синхронных электрических машинах

Эффективное предотвращение пожаров в СЭМ требует комплексного применения технических, организационных и эксплуатационных мер, соответствующих требованиям действующих нормативных документов – ФЗ-123, Правила устройства электроустановок (ПУЭ), Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей электрической энергии (ПТЭЭП), ГОСТ 12.1.004–91 «Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность. Общие требования», СП 6.13130.2013 «Системы противопожарной защиты. Электрооборудование. Требования пожарной безопасности» и отраслевых стандартов.

Технические меры:

1. Контроль температуры узлов – установка термодатчиков в зонах обмоток статора, ротора и подшипников, подключённых к системе аварийного отключения. Согласно ГОСТ 12.1.004–91 температура не должна превышать допустимые значения для класса изоляции.

2. Мониторинг состояния изоляции – использование приборов контроля сопротивления изоляции в режиме онлайн с автоматической регистрацией трендов.

3. Защита от токов короткого замыкания – применение быстродействующих автоматических выключателей, предохранителей и реле, настроенных в соответствии с ПУЭ, гл. 3.1–3.4.

4. Системы пожарной автоматики – интеграция тепловых и дымовых извещателей вблизи электрических машин, а также установка модулей газового пожаротушения в закрытых помещениях.

Организационные меры:

1. Разработка и соблюдение регламентов ТО – выполнение планово-предупредительных ремонтов и диагностических проверок в сроки, установленные ПТЭЭП.
2. Обучение персонала – проведение регулярных инструктажей по пожарной безопасности и электробезопасности с аттестацией знаний.
3. Аудит пожарных рисков – ежегодная оценка состояния оборудования и условий его эксплуатации с оформлением акта по результатам проверки.
4. Контроль допуска к работе – обеспечение работы с оборудованием только квалифицированного персонала.

Эксплуатационные меры:

1. Предотвращение перегрузок – эксплуатация машины в пределах номинальных параметров по нагрузке, току и температуре.
2. Своевременное устранение неисправностей – немедленное выведение оборудования из эксплуатации при обнаружении запаха гари, вибрации или перегрева, непрерывный контроль технического состояния.
3. Чистота рабочих зон – регулярная очистка вентиляционных каналов и поверхностей от пыли и загрязнений, являющихся потенциальным топливом при возгорании.
4. Контроль внешних факторов – предотвращение попадания влаги, посторонних предметов и агрессивных веществ на оборудование.

Применение комплекса указанных мер позволяет значительно снизить вероятность пожара в синхронных электрических машинах, а также минимизировать последствия возможных аварий. Наиболее эффективным считается сочетание постоянного мониторинга технического состояния с автоматическими системами обнаружения и тушения пожара, интегрированными в систему управления оборудованием.

Предложения по совершенствованию нормативов и практик эксплуатации

Нормы к температурным режимам, изоляции и перегрузкам отражены в ПУЭ, ПТЭЭП и ГОСТ 12.1.004–91. Они требуют защиты от перегрева и контроля состояния изоляции. Эти нормы ориентированы на периодический контроль, тогда как фактическая нагрузка и термоциклирование требуют непрерывного мониторинга состояния. Для улучшения пожарной безопасности необходимо формализовать требование онлайн-контроля и трендового анализа, порогов предупреждения/отключения, описать методики оценки остаточного ресурса изоляции с учётом перегрузок.

СП 6.13130.2013 и ФЗ-123 требуют предотвращения распространения пожара, разделения объёмов, применения автоматических установок пожаротушения (АУПТ). Однако в них отсутствует детальная регламентация масло-туманоуловителей, поддонов-лотков, отсеков, локальной аспирации и быстродействующих АУПТ для масляных очагов вблизи СЭМ. Для совершенствования норм необходимо заимствовать лучшие практики, например из NFPA 850. Возможно использование требований к локальным газовым/аэрозольным модулям над зонами подшипников и уплотнений, маслоуловителям, автоматическим отсекам подачи масла, отдельной вентиляции ниш с приводами.

В общих требованиях ФЗ-123/СП 6 и промышленных практик по газоопасным средам нет детализированного национального описания комплексов H₂-безопасности генераторов (герметичность, инертнизация CO₂, межблокировка, датчики H₂, сценарии аварийного стравливания). В этой связи необходимо закрепить в локальных регламентах типовые матрицы причин-следствий, двухканальный газоанализ H₂, алгоритмы «H₂→CO₂→воздух», классификацию взрывозащиты арматуры.

Требования по предотвращению вибраций, исправности подшипников и предотвращению механических дефектов указаны в ПТЭЭП/ПУЭ – контроль состояния и ремонт. Нормативы не привязывают пороги срабатывания к ISO/IEC 20816 и метрикам трендового мониторинга (вибрация/температура подшипника/состояние смазки). Необходимо

во всех эксплуатационных стандартах предприятий ввести уровни предупреждения/аварии по вибрации, обязать автоматическое отключение при критическом росте температур в опорах.

Требования к пожарной автоматике (обнаружение/тушение) указаны в ГОСТ 53325–2012 – типы извещателей и критерии оснащения. Здесь мало внимания уделено очагам возгорания внутри корпусов, кожухов и кабельных вводов СЭМ. Необходимо внести изменения и размещать тепловые линейные/ИК извещатели пламени с нацеливанием на узлы СЭМ (подшипники, клеммные коробки), локально-направленное газовое/аэрозольное тушение с минимальным простоем и без вторичного ущерба.

В рамках постоянного мониторинга возможно применение электромагнитного спектрального метода диагностики, который позволяет фиксировать отклонения в характере работы СЭМ ещё на начальной стадии развития неисправности, когда вероятность воспламенения ещё не велика. Данный метод целесообразно рассматривать как один из ключевых инструментов профилактики пожаров. Для комплексной оценки предлагается использовать интегральный критерий пожарной опасности, такой критерий позволяет перейти от качественной оценки риска к количественной, что важно при сопоставлении различных режимов эксплуатации и при разработке мероприятий по снижению пожарной опасности. Показатель технического состояния далее сопоставляется с уровнем пожарной опасности и является подходящим для автоматизированного мониторинга и управленческих решений.

Диагностическим индикатором технического состояния может являться интегральный показатель технического состояния синхронной машины согласно формуле (1). Обоснование количественной связи между изменениями параметров спектра гармонических составляющих фазных токов и напряжений возникающих из-за ухудшения технического состояния синхронных электрических машин и уровнем их пожарной опасности приведено в работе М.Г. Баширова и Н.Д. Дюльдина «Определение уровня пожарной опасности синхронных электрических машин по значениям параметров гармонических составляющих фазных токов и напряжений» [16]:

$$K_{\text{тех}} = \sum_{\phi \in \{A, B, C\}} \sum_{i=1}^n w_i * P_i, \quad (1)$$

где $K_{\text{тех}}$ – интегральный показатель технического состояния синхронной машины; $\phi \in \{A, B, C\}$ – фаза (А, В, С); w_i – весовой коэффициент диагностического параметра i ; P_i – значения диагностических параметров ($K_{I(n)}$ – коэффициенты гармонических составляющих фазных токов, $K_{U(n)}$ – коэффициенты гармонических составляющих фазных напряжений, $\phi_{I(n)}$ – начальная фаза n -й гармонической составляющей фазного тока, $\phi_{U(n)}$ – начальная фаза n -й гармонической составляющей фазного напряжения); n – номера гармонических составляющих фазных токов и напряжений.

Пожарный риск агрегирован в интегральный показатель в формуле:

$$D_{\Sigma} = f(K_{\text{тех}}, T_{\text{обм}}, T_{\text{пш}}, T_{\text{ос}}, R_{\text{из}}, C_{\text{вэб}}, K_{\text{знач}}),$$

где f – функция, реализуемая нейронной сетью; $K_{\text{тех}}$ – интегральный показатель технического состояния; $T_{\text{обм}}$, $T_{\text{пш}}$ – температуры обмотки и подшипников; $T_{\text{ос}}$ – температура окружающей среды; $R_{\text{из}}$ – сопротивление изоляции; $C_{\text{вэб}}$ – колебания в системе возбуждения синхронной машины (величины флуктуации тока и напряжения возбуждения); $K_{\text{знач}}$ – коэффициент значимости пожарной опасности синхронной машины (на основе статистики пожаров).

Алгоритм внедрения может выглядеть следующим образом:

1) Аудит измерений с подтверждением, что применяемые анализаторы поддерживают экспорт в системы SCADA/MES/EAM.

2) Эталонная карта состояния с набором спектральных паттернов «норма/переходный/опасный/критический».

3) Настройка интегральных индексов и порогов с учетом внешних условий эксплуатации СЭМ.

4) Предварительный онлайн мониторинг нескольких машин, накопление истории событий, верификация ложноположительных/ложноотрицательных событий.

5) Интеграция в действующие правила, нормы, технические регламенты.

6) Масштабирование системы.

Преимуществами электромагнитного спектрального метода диагностики СЭМ как нового метода являются: ранняя чувствительность к дефектам, количественная сопоставимость с пожарными критериями, цифровая готовность метода к интеграции в действующие системы, совместимость с нормативно технической документацией.

Заключение

В ходе исследования выполнен анализ статистики пожаров, установлены основные причины их возникновения, а также проведено расчётно-аналитическое обоснование уровня пожарного риска.

Результаты анализа показали, что наибольшая доля пожаров (42 %) связана с электрическими причинами, включая повреждения изоляции, короткие замыкания и перегрузки, значительный вклад (21 %) вносят эксплуатационные факторы, обусловленные нарушением регламентов технического обслуживания. Тяжесть последствий пожаров, по результатам экономической оценки, может достигать 2 млрд руб. в зависимости от стоимости оборудования и длительности простоев.

В качестве основных мер предотвращения пожаров рекомендуется:

1. Внедрение систем непрерывного мониторинга температуры, вибрации и сопротивления изоляции, основанных на электромагнитном спектральном методе диагностики.

2. Применение автоматических систем пожарной сигнализации и газового пожаротушения в машинных залах, направленных непосредственно на очаги возгорания.

3. Оптимизация регламентов технического обслуживания с учётом фактического состояния оборудования.

4. Повышение квалификации обслуживающего персонала и регулярная аттестация по вопросам пожарной и электрической безопасности.

Таким образом, интеграция технических, организационных и эксплуатационных мер, предусмотренных нормативными документами (ФЗ-123, ПУЭ, ПТЭЭП, ГОСТ 12.1.004–91), позволяет существенно снизить вероятность пожаров и минимизировать их последствия. Результаты исследования могут быть использованы при разработке отраслевых инструкций и стандартов по обеспечению пожарной безопасности электрооборудования.

Список источников

1. Иванов А.Ю., Петров В.И. Пожары различных видов электроустановок и способы их тушения // Пожарная безопасность. 2019. № 2. С. 45–52.

2. Хрисониди В.А., Кобзарь В.В., Логинов А.С. Пожарная безопасность электроустановок: учеб. пособие. М.: Академия ГПС МЧС России, 2019. 210 с.

3. Смирнов А.П., Козлов И.В., Сафронов Д.Л. Пожарная безопасность электрогенераторных установок // Проблемы пожарной безопасности. 2020. № 3. С. 65–72.

4. Андреев Д.П., Федоров В.М., Лисицын А.В. Нарушение правил эксплуатации электрических сетей как основной фактор возникновения пожара // Пожаровзрывобезопасность. 2018. Т. 27. № 7. С. 58–66.

5. Рашоян И.И. Оценка рисков для работников промышленных предприятий при возникновении чрезвычайных ситуаций и пожаров // Проблемы управления рисками в техносфере. 2024. № 4 (72). С. 62–69. DOI: 10.61260/1998-8990-2024-4-62-69

6. Тряпицын А.Б., Полунин Г.А. Анализ недостатков методики расчета пожарного риска в зданиях непромышленного назначения и разработка рекомендаций по ее совершенствованию // Сибирский пожарно-спасательный вестник. 2021. № 1 (20). С. 44–49.
7. Шлома В.В. Анализ статистики пожаров и пожарных рисков в Донецкой Народной Республике // Сибирский пожарно-спасательный вестник. 2023. № 2 (29). С. 193–201. DOI: 10.34987/vestnik.sibpsa.2023.18.44.012
8. Андреев А.В., Бызов А.П., Орловский П.С. Методика балльно-факторной оценки частоты инициирующих пожароопасные ситуации событий для подземных емкостей автомобильной газозаправочной станции // Проблемы управления рисками в техносфере. 2023. № 4 (68). С. 131–141. DOI: 10.61260/1998-8990-2023-4-131-141
9. Горячева М.О., Актерский Ю.Е., Минкин Д.Ю. Анализ проблемы снижения пожарного риска на объектах водородной энергетики и нефтегазового комплекса // Проблемы управления рисками в техносфере. 2022. № 4 (64). С. 55–61.
10. Rezaei A.H., Abedini M., Davarpanah M. Internal faults in stator winding of synchronous generator // Modelling, detecting and protecting. IET Generation, Transmission & Distribution. 2024. Vol. 18. Iss. 22. P. 3579–3591. IET Research Journals.
11. Electrical Insulation for Rotating Machines: Design, Evaluation, Aging, Testing, and Repair / G.C. Stone [et al.]. 2nd ed. Hoboken, NJ: Wiley-IEEE Press, 2014. 680 p.
12. Balasubramanian R., Karthikeyan S. Failure modes of synchronous generators and associated fire risks // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2021. Vol. 133. P. 107–115.
13. Sun J., Zhang H., Li P. Fire accidents in rotating electrical machines: statistical analysis and prevention strategies // Fire Safety Journal. 2020. Vol. 111. P. 102–113.
14. Присяжнюк Н.Л., Малько В.А. Интегральный социально-экономический показатель пожарного риска и методика его оценки // Технологии техносферной безопасности: интернет-журнал. 2018. № 3 (79).
15. Иванов С.В., Кузнецов А.Л. Оценка рисков для работников промышленных предприятий при возникновении чрезвычайных ситуаций и пожаров // Проблемы управления рисками в техносфере. 2024. № 4. С. 56–64.
16. Баширов М.Г., Дюльдин Н.Д. Определение уровня пожарной опасности синхронных электрических машин по значениям параметров гармонических составляющим фазных токов и напряжений // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. 2025. Т. 14. № 3 (71). С. 235–245. EDN: CLVMTV.

References

1. Ivanov A.Yu., Petrov V.I. Pozhary razlichnyh vidov elektroustanovok i sposoby ih tusheniya // Pozharnaya bezopasnost'. 2019. № 2. S. 45–52.
2. Hrisonidi V.A., Kobzar' V.V., Loginov A.S. Pozharnaya bezopasnost' elektroustanovok: ucheb. posobie. M.: Akademiya GPS MCHS Rossii, 2019. 210 s.
3. Smirnov A.P., Kozlov I.V., Safronov D.L. Pozharnaya bezopasnost' elektrogeneratornyh ustanovok // Problemy pozharnoj bezopasnosti. 2020. № 3. S. 65–72.
4. Andreev D.P., Fedorov V.M., Lisicyan A.V. Narushenie pravil ekspluatatsii elektricheskikh setej kak osnovnoj faktor vozniknoveniya pozhara // Pozharovzryvobezopasnost'. 2018. T. 27. № 7. S. 58–66.
5. Rashoyan I.I. Ocenka riskov dlya rabotnikov promyshlennyh predpriyatij pri vozniknovenii chrezvychajnyh situacij i pozharov // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere. 2024. № 4 (72). S. 62–69. DOI: 10.61260/1998-8990-2024-4-62-69
6. Тряпицын А.Б., Полунин Г.А. Анализ недостатков методики расчета пожарного риска в зданиях непромышленного назначения и разработка рекомендаций по ее совершенствованию // Сибирский пожарно-спасательный вестник. 2021. № 1 (20). С. 44–49.

7. Shloma V.V. Analiz statistiki pozharov i pozharnyh riskov Doneckoj Narodnoj Respublike // Sibirskij pozharno-spasatel'nyj vestnik. 2023. № 2 (29). S. 193–201. DOI: 10.34987/vestnik.sibpsa.2023.18.44.012
8. Andreev A.V., Byzov A.P., Orlovskij P.S. Metodika ball'no-faktornoj ocenki chastoty iniciiruyushchih pozharoopasnye situacii sobytij dlya podzemnyh emkostej avtomobil'noj gazozapravochnoj stancii // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere. 2023. № 4 (68). S. 131–141. DOI: 10.61260/1998-8990-2023-4-131-141
9. Goryacheva M.O., Akterskij Yu.E., Minkin D.Yu. Analiz problemy snizheniya pozharnogo riska na ob"ektah vodorodnoj energetiki i neftegazovogo kompleksa // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere. 2022. № 4 (64). S. 55–61.
10. Rezaei A.H., Abedini M., Davarpanah M. Internal faults in stator winding of synchronous generator // Modelling, detecting and protecting. IET Generation, Transmission & Distribution. 2024. Vol. 18. Iss. 22. P. 3579–3591. IET Research Journals.
11. Electrical Insulation for Rotating Machines: Design, Evaluation, Aging, Testing, and Repair / G.C. Stone [et al.]. 2nd ed. Hoboken, NJ: Wiley-IEEE Press, 2014. 680 p.
12. Balasubramanian R., Karthikeyan S. Failure modes of synchronous generators and associated fire risks // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2021. Vol. 133. P. 107–115.
13. Sun J., Zhang H., Li P. Fire accidents in rotating electrical machines: statistical analysis and prevention strategies // Fire Safety Journal. 2020. Vol. 111. P. 102–113.
14. Prisyazhnyuk N.L., Mal'ko V.A. Integral'nyj social'no-ekonomicheskij pokazatel' pozharnogo riska i metodika ego ocenki // Tekhnologii tekhnosfernoj bezopasnosti: internet-zhurnal. 2018. № 3 (79).
15. Ivanov S.V., Kuznecov A.L. Ocenka riskov dlya rabotnikov promyshlennyh predpriyatij pri vozniknovenii chrezvychajnyh situacij i pozharov // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere. 2024. № 4. S. 56–64.
16. Bashirov M.G., Dyul'din N.D. Opredelenie urovnya pozharnoj opasnosti sinhronnyh elektricheskikh mashin po znacheniyam parametrov garmonicheskikh sostavlyayushchim faznyh tokov i napryazhenij // XXI vek: itogi proshlogo i problemy nastoyashchego plyus. 2025. T. 14. № 3 (71). S. 235–245. EDN: CLVMTV.

Информация о статье:

Статья поступила в редакцию: 26.09.2025; одобрена после рецензирования: 10.12.2025;
принята к публикации: 12.01.2026

The information about article:

The article was submitted to the editorial office: 26.09.2025; approved after review: 10.12.2025;
accepted for publication: 12.01.2026

Информация об авторах:

Баширов Мусса Гумерович, заведующий кафедрой «Электрооборудование и автоматика промышленных предприятий» Уфимского государственного нефтяного технического университета (453250, г. Салават, ул. Губкина, д. 22 Б), доктор технических наук, профессор, e-mail: eapp@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7493-6803>, SPIN-код: 6730-2607

Дюльдин Никита Денисович, аспирант кафедры «Пожарная безопасность» Уфимского государственного нефтяного технического университета (450044, г. Уфа, ул. Матвея Пинского, д. 4), e-mail: hukutko2014@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0002-2628-5975>, SPIN-код: 8947-8702

Information about the authors:

Bashirov Mussa G., head of the department of «Electrical equipment and automation of industrial enterprises» of the Ufa state petroleum technological university (453250, Salavat, Gubkina St., 22B), doctor of technical sciences, professor, e-mail: eapp@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7493-6803>, SPIN: 6730-2607

Dyuldin Nikita D., postgraduate student of the department of «Fire Safety» of the Ufa state petroleum technological university (450044, Russia, Ufa, Matveya Pinskogo St., 4), e-mail: hukutko2014@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0002-2628-5975>, SPIN: 8947-8702